

先行需要情報を用いた生産在庫システムの シミュレーション分析

王 曉 華

1. はじめに

先行需要情報 (Advance demand information, ADI) は、出荷に先行して顧客から受け取る注文情報のことである。注文の到着から納期までの時間は需要リードタイムと呼ばれる[1]。ADIはさまざまな形で存在している。たとえば、メーカーがサプライヤーに提示する内示計画はADIの一種である[2]。オンラインショップが受け取った顧客の注文もADIといえる。また、ADIを活用することがサプライチェーンの効率および効果につながる。たとえば、生産企業が内示計画を用いてより正確な生産計画を立てることができる。オンラインショップはADIを価格設定や顧客セグメントの区分などに利用し、コスト削減の効果が期待できる[3]。しかし、ADIには確定の情報もあり、注文のキャンセルや数量・納期の変更など不十分な情報もある[4]。多くの場合、ADIを利用する効果が見られるが、採用する戦略によって効果の程度が違う[5, 6]。本論文では、不確実なADIをもつ多段階のプル生産在庫システムを対象とし、シミュレーションと統計の手法を用いてシステムの性能を解析する。

近年、ADIを考慮した生産在庫システムに関する研究が多くなされてきた[4-9]。ここで、シミュレーション手法でADIをもつプル生産在庫システムを対象とする研究を紹介する。[6]では、3段階のかんばん制御の生産在庫システムを対象にADIの有無の効果を解析している。ADIがある場合、生産リードタイムより需要リードタイムが長ければ、生産は見込生産 (Make-to-stock, MTS) から受注生産 (Make-to-order, MTO) に転換でき、つまり延期戦略をとることができる。そして、需要の早期出荷が許されず、ジャ

スインタイムで納入するが、納期の時点で在庫が不足の場合、受注残が許容されている。シミュレーション実験の要因は到着率やかんばん枚数、基点在庫水準、需要リードタイムなどで、評価尺度は平均在庫や受注残、平均総費用などである。ADIを利用した多くの場合、受注残や仕掛在庫、総在庫などの削減の効果があり、提案しているシステムは単純なプルシステムより効率がよいと報告されている。[5]では、ADIを考慮した3段階の生産在庫システムを対象とし、早期納入が許容されると仮定してシステムを解析している。その結果はADIの有効性が確認され、そしてかんばん制御と早期納入の併用の案が最良であると結論づけている。しかし、これらの研究では、注文は1回あたり製品1個の到着と仮定し、バッチサイズを考慮していない。そこで本研究では、顧客の注文はバッチサイズで到着し、そして注文量が確率分布に従うと仮定し、[6]のモデルを拡張する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では本論文で取り扱う生産在庫システムについて述べる。3章ではシミュレーションモデルを構築する。4章ではシミュレーション実験を実施し、その結果を考察する。5章では結論を述べる。

2. 対象生産在庫システム

2.1 前提条件

本研究では、図1に示す多段階生産在庫システムを取り上げる。なお、以下の前提条件をもつと仮定する。製品は単一の標準製品とし、需要の到着率はポアソン分布、需要量はバッチで正規分布に従うとする。

- (1) 生産工程は直列の3段階から構成される。各工程での生産リードタイムは正規分布に従い、工程間の運搬時間はゼロとする。
- (2) 最終工程で生産済みの在庫を製品在庫 (FG) とし、各工程で加工中あるいは生産待ちの在庫を仕掛在庫 (WIP) とする。製品在庫が不足の場合、受注残 (BD) が生じる。
- (3) 生産在庫の制御は基点在庫方式とかんばん方式を統合するプル生産方式を採用する。次節では、詳細に述べる。

- (4) 需要のキャンセルや早く出荷が許されない。
- (5) そのほかには、資材の制約や不良品などを考慮しない。

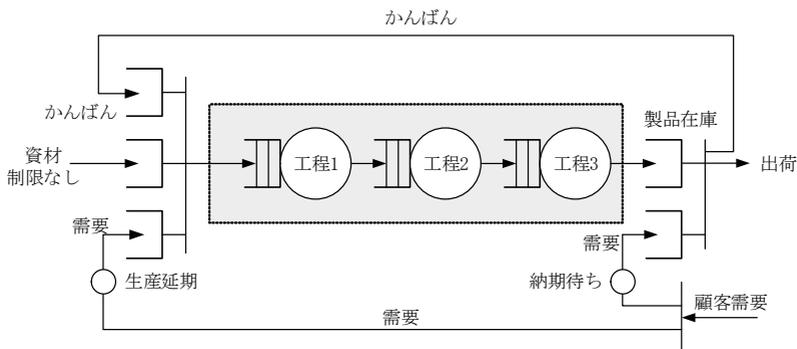


図1 多段階生産在庫システム ([6] を加筆)

2.2 生産在庫システムの制御方式

本研究では、[6]で示されたモデルをもとにし、需要量がバッチサイズで到着することを考慮し、モデルを拡張する。具体的には、対象システムの制御方式はかんばん方式と基点在庫方式を統合する拡張かんばん方式[10, 11]に基づき、需要リードタイムが計画生産リードタイム (LT) より長い場合は、生産を延期する。計画生産リードタイムは生産時間の確率分布の平均値をとる。ただし、生産のバッチサイズにより平均値が異なると仮定する。かんばん枚数は上限値 (K)、基点在庫は水準 (S) を設定する。システムの初期状態では製品在庫を水準 (S) にし、1つの製品に1枚のかんばんを使用する。すなわち、 $(K-S)$ 枚のかんばんは予備として利用される。この方式により、システムにおける仕掛在庫および製品在庫の上限が制限される。

本研究では、ADIなしおよびADIありのシステムを考慮する。ADIなしの場合、需要が到着したら、製品在庫から需要を満たす。手持ち在庫が足りない場合、受注残が生じ、該当需要は十分な在庫が補充されるのを待つ。かんばん方式を採用するため、製品在庫が使用される時点で、使用された分のかんばんが外される。また、基点在庫方式では、毎回減少した量、つ

まり需要量を生産指示量として生産工程に送る。この方式では、受注残が許容されるため、生産指示量と外されたかんばん枚数が相違の可能性がある。本システムでは、資材の制約がないので、生産可能な時刻はかんばんと需要量が揃う時点となる。なお、到着した需要量のバッチで生産を行う。ADIを利用する場合、需要と生産の延期以外は、ADIなしの場合と同じである。言い換えれば、ADIを利用する場合であっても、需要リードタイムがゼロであれば、この需要はADIなしと同じである。出荷まで需要リードタイムの期間があるため、この期間が経過した後、需要を満たす。一方、生産指示も可能であれば、延期を行う。需要情報が到着したら、需要リードタイムと計画生産リードタイムを比較し、需要リードタイムが短いなら、すぐ生産工程へ生産指示を出す。それに反して、計画生産リードタイムと需要リードタイムの差を遅延させる。いずれの場合、ADIなしと同様に、生産着手ができるのは、生産指示かんばんと需要が揃うという条件を満たさなければならない。

3. シミュレーションモデル

3.1 モデルの概要

Arena/SIMAN [12]を用い、シミュレーションモデルを構築した。モデルの主なフローチャートを図2に示す。アニメーションや定数の入力データなどでシミュレーションモデルの妥当性を検証した。図3は実行中の在庫変動である。

効果的なシミュレーション結果を得るために、多数の実験を行う必要がある。本研究では、効率的にシミュレーション実験を行うために、Visual Basic for Applications (VBA) を用い、自動的にシミュレーション実験を行う手続きを設計した。具体的には、シミュレーションモデルのファイルを開き、実験回数だけを入力し、提案した手続きにより、EXCELファイルに保存されている実験データが自動的に読み取られ、シミュレーションを実行した結果も自動的にEXCELファイルに書き込まれる。

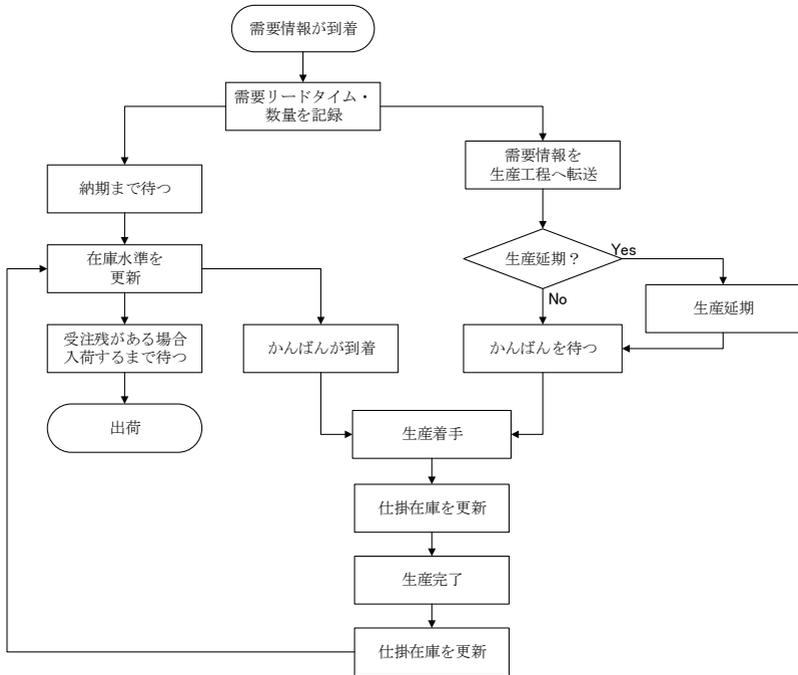


図2 シミュレーションモデルのフローチャート

すべてのシミュレーション実行時間は22000時間単位（分）で、初期条件の偏りを減らすために、観測により2000時間単位のウォームアップ期間を設定し、それ以前の観測値を切り捨てる。つまり、シミュレーション結果はそれ以降の観測値から得る。[13]によると、切り捨て時点を選定するための最善の方法は、観測によるものである。

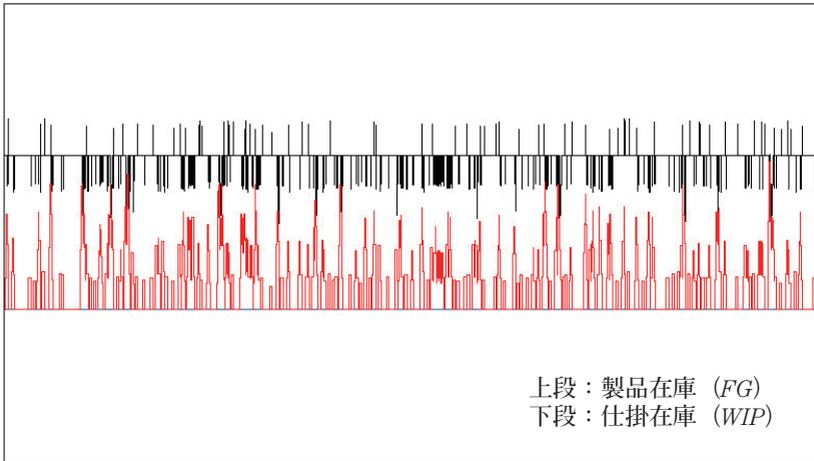


図3 シミュレーション実行中の在庫変化

3.2 入力データ

シミュレーションモデルの入力データは以下のとおりである。

- (1) 需要情報の到着率 λ
- (2) 需要量の平均値 μ_d と変動係数 $CV_d = \sigma_d / \mu_d$
- (3) 需要リードタイムの平均値 μ_L と変動係数 $CV_L = \sigma_L / \mu_L$
- (4) 生産リードタイムの平均値 μ_{LT} と変動係数 $CV_{LT} = \sigma_{LT} / \mu_{LT}$
- (5) かんばん枚数 K
- (6) 基点在庫水準 S

ただし、本研究では1工程で1製品の平均生産リードタイムは1時間単位(分)と仮定するため、各バッチの生産リードタイムはバッチサイズにより違い、そして自動的に計算される。

3.3 評価尺度

対象とするシステムを分析するために、シミュレーションモデルでは以

下の出力を用意している。

- (1) 平均仕掛在庫

$$WIP = \frac{\int_0^T WIP(t)dt}{T} \quad (1)$$

$WIP(t)$ は t 時刻の仕掛在庫, T はシミュレーション実行期間である。

- (2) 平均製品在庫

$$FG = \frac{\int_0^T IL^+(t)dt}{T} \quad (2)$$

ここで, $IL(t)$ は t 時刻の在庫水準で, 出荷量が発生したらその量を減らし, 生産が完了したら生産済みの量を増やす。 $IL^+(t)$ は $\max(IL(t), 0)$, $IL^-(t)$ は $\max(-IL(t), 0)$ *である。

- (3) 平均受注残

$$BD = \frac{\int_0^T IL^-(t)dt}{T} \quad (3)$$

- (4) サービスレベル

本研究では, 充足率を用いてサービスレベルを評価する。充足率とは, 顧客の需要量に対して手持ち在庫から満たす比率である。

$$SL = \frac{\sum_{t=0}^T \text{MIN}(IL^+(t), D(t - L_i, t))}{\sum_{t=0}^T D(t - L_i, t)} \quad (4)$$

$D(t - L_i, t)$ は i 番目の需要が $(t - L_i)$ 時刻に到着し, t 時刻に出荷すべき需要量である。 L_i は i 番目需要のリードタイムであり, 正規分布に従うとする。

(5) 平均総費用

$$TC = w \cdot WIP + h \cdot FG + b \cdot BD \quad (5)$$

ここで、 w は仕掛在庫の単位時間・1製品当たりの保管費用、 h は製品在庫の単位時間・1製品当たりの保管費用、 b は受注残の単位時間・1製品当たりの費用である。

ほかに、受注残のある需要の待ち時間やリソースの稼働率なども用意されているが、本研究では、上述の指標を利用してシステムパフォーマンスを解析する。

4. 実験計画および結果解析

本研究では、シミュレーション実験を2回行った。1回目は、ADIの効果があるかどうかを確認するための実験である。2回目は、ADIを利用したシステムパフォーマンスを解析するための実験である。

4.1 ADIの有無の効果

ADIの効果を評価するために、需要リードタイムの平均値と基点在庫水準を組み合わせ、シミュレーション実験を実行した。実験データを表1に示す。

表1 シミュレーション実験のパラメータ

項目	値
需要の到着率 λ	0.8
需要量の平均値 μ_d	20
需要量の変動係数 CV_d	0.1
需要リードタイムの平均値 μ_L	0,30,40,50,60,70,80
需要リードタイムの変動係数 CV_L	0.1
生産リードタイムの変動係数 CV_{LT}	0.1
かんばん枚数 K	200
基点在庫水準 S	10~140, 10 ずつ増加させる
単位あたり費用の比率 $w : h : b$	1 : 5 : 10

各需要リードタイムの平均値に対して、サービスレベルが95%以上のシミュレーション結果から、平均総費用が最小のシナリオを抽出した。表2はその最良の結果である。表の2列目は需要リードタイム μ_L で、3列目は基在庫水準（初期在庫）である。 μ_L がゼロの場合、ADIがないという意味である。つまり、需要が到着したら、すぐ在庫から需要量を満たして出荷する。3行目からADIを利用した結果である。この場合、需要情報の到着から出荷まで、需要リードタイムが存在し、もしこの期間は計画生産リードタイムより長いなら、生産を延期する。

表2 各実験における最良の結果

No.	μ_L	S	WIP	FG	BD	SL	$WIP+FG$	TC
1	0	96	21.61	72.73	0.04	98.30%	94.34	385.64
2	30	64	19.52	52.53	0.02	98.13%	72.05	282.33
3	40	64	19.89	54.14	0.99	95.51%	74.03	300.51
4	50	56	20.13	50.81	0.06	97.98%	70.94	274.73
5	60	38	17.54	36.36	0.02	98.35%	53.90	199.58
6	70	34	18.17	32.84	0.04	98.08%	51.01	182.76
7	80	36	19.94	34.48	0.04	98.43%	54.41	192.70

さらに、平均在庫（仕掛在庫，製品在庫，仕掛在庫と製品在庫の合計）と平均総費用の変動を、それぞれ図4と図5に示す。これらの図および表から、以下のことがわかる。

- (1) ADIを利用した結果は、明らかに利用しない場合より良い。効果は主に製品在庫の減少によるものである。たとえば、 μ_L がゼロの場合、 FG は72.73であるのに対して、 μ_L が30の場合、 FG は52.53に減少した。しかし、 WIP はほぼ変わらない。リトルの法則により、 WIP は生産工程のスループットと生産リードタイムに関わり[14]，生産着手時刻に関係がないといえる。
- (2) ADIを利用した場合、 μ_L の値によって効果が異なっている。シナリオ2から4まで、効果はほぼ変わらない。シナリオ5から7までも、同じく

変化がほぼ見られない。しかし、この2組の間に効果の改善が明らかに存在する。図4と図5からわかるように、 μ_L の増大により、平均総在庫および平均総費用が下がる。この結果の原因はつぎのように考えられる。まず、本研究では、生産リードタイムも確率分布に従い、各バッチの実際の生産時間が異なる。シナリオ2から4にかけて、生産リードタイムと需要リードタイムが重なることが考えられる。その結果、同じシナリオでも、時には受注生産でき、時にはできない可能性がある。これは効果の鈍化の理由として考えられる。つぎに、シナリオ5から需要リードタイムが生産リードタイムより長くなり、完全に受注生産ができるようになる。これは明確に効果が改善された理由であろう。しかし、シナリオ8からやや上がる気配が見られ、これ以上効果が上がらないと考えられる。もし、原材料の調達や生産能力の調整などが必要となる場合、 μ_L が長ければ長いほど、生産の柔軟性が増えるであろう。

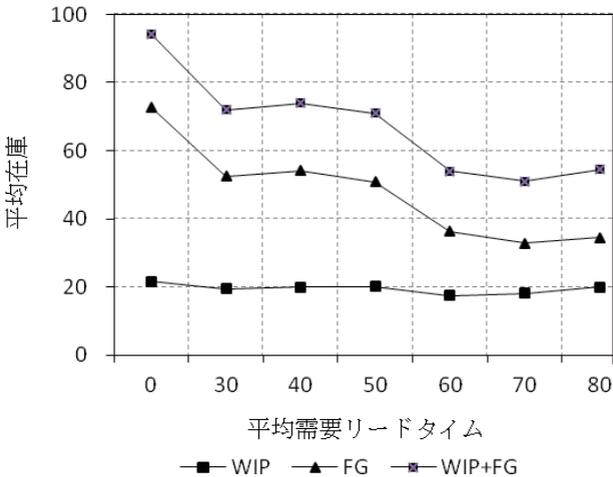


図4 ADIの有無による在庫の変動状況

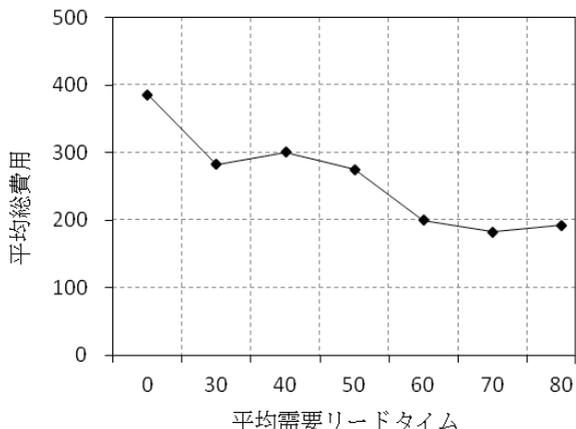


図5 平均総費用の比較

4.2 ADIを利用したシステムの性能評価

前節では、ADIの有無の効果を評価した。本節では、平均総在庫とサービスレベルを尺度として、ADIを利用するシステムのパフォーマンスを解析する。そのために、表3に示す因子と水準でBox-Behnken計画を用いた実験計画を立て、中心点の数および反復の回数をそれぞれ6点と4回追加し、合計310回のシミュレーション実験を実施した。シミュレーション結果の一部を付録の表A-1に示す。つぎは出力した結果のデータに対して、JMP11を用いて統計分析および考察を行う。

表3 実験の計画

因子	水準	
	下限値	上限値
X1: 需要の到着率 λ	0.5	0.9
X2: 需要量の平均値 μ_d	16	24
X3: 需要量の変動係数 CV_d	0.1	0.7
X4: 需要リードタイムの平均値 μ_L	30	80
X5: 需要リードタイムの変動係数 CV_L	0.1	0.7
X6: かんばん枚数 K	100	200
X7: 基点在庫水準 S	50	100

(1) 平均総在庫

ここで、各要因が平均総在庫に与える影響を調べるために、モデルのあてはめを数回行った。有意でない項を除き、最後あてはめられたモデルの決定係数 R^2 は0.931484で、モデルの精度が十分高いといえる。また、分散分析表を表4に、パラメータの推定値を付録の表A-2に、要因間の交互作用を図A-1に示す。これらの表と図から、モデルは有意であり、つまり評価尺度に対して要因の影響があることと、そして影響度合いもわかる。ただし、因子X5の影響が極めて小さいことはモデルのあてはめを行った際にわかり、モデルから除いた。なぜこの因子の影響がほとんど見られないかを後述する。

表4 平均総在庫に関する分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
モデル	22	253980.66	11544.6	177.3533
誤差	287	18681.88	65.1	p 値 (Prob>F)
全体 (修正済み)	309	272662.54		<.0001*

つぎに、上述した表と図に加え、予測プロファイルおよび応答曲面のグラフを用い、各要因および主要な要因間の交互作用を考察する。予測プロファイルはJMPにおけるモデルのあてはめの出力であり、そこでは変数を変化させ、それが応答の予測値に与える効果を観測することができる。平均総在庫の予測プロファイルを図6に示す。図6から、X1, X2, X3の増加によって在庫が減り、X4の場合はほぼ横ばい、X6, X7の増加によって上がるということがわかる。X6とX7はそれぞれ、かんばん枚数と基点在庫水準であるため、これらの量が増えると在庫も増える。X1, X2, X3は需要の到着率と需要量に関わる要因で、これらの値の増加により、需要量の増加か変動につながる。リスクの要因として考えられる。つまり、変動が大きくなると、ほかの因子が同じ条件であれば、品切れの確率が増え、平均在庫が下がるが、サービスレベルも下がると考えられる。この点について、サービスレベルを考察するとき、再度確認する。

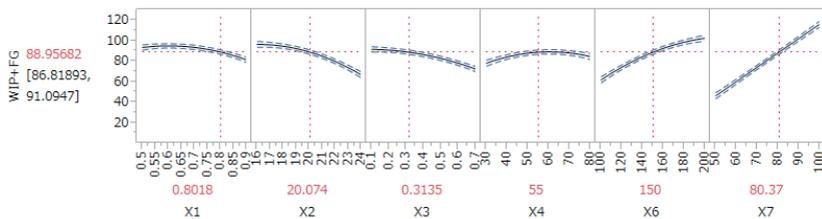


図6 平均総在庫の予測プロファイル

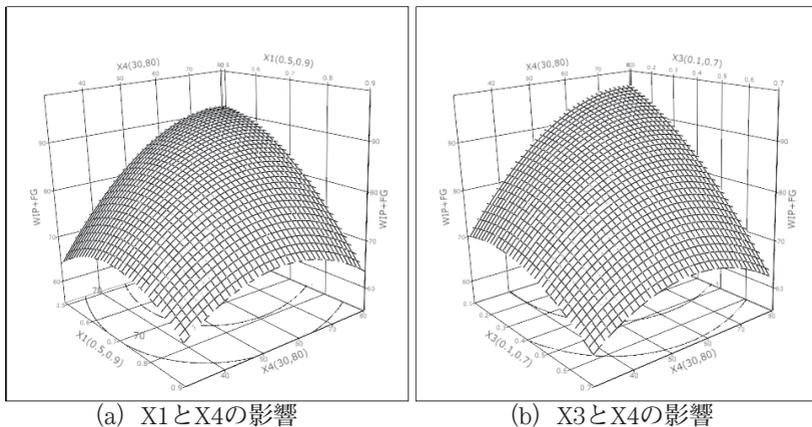


図7 平均総在庫に関する応答曲面

さらに、付録の図A-1を見てみると、要因間の交互作用がわかる。この中から、 $X1X4$ と $X3X4$ を取り上げて考察する。図7の (a) は平均総在庫と $X1$, $X4$ に関する応答曲面である。 $X4$ が下限値の場合、 $X1$ の増加によって平均総在庫はほぼ変わらない。それに対して、 $X4$ が上限値をとる場合、 $X1$ の増加によって平均総在庫が下がる。言い換えれば、 $X4$ の値が小さいとき、応答に影響をほぼ与えない。図の下にある曲線は等高線で、つまりこの線にある応答は同じ値をもつ。これは応答がどのように因子によって変化するかがすぐわかる。たとえば、 $X1=0.7$, $X4=30$ の場合、平均総在庫はおよそ70になる。 $X1=0.9$, $X4=50$ の場合でも、平均総在庫は70になる。前提条件として、この2つ以外の因子が一定値に保つ。つぎに、図7の (b) を見てみると、応答曲面は図 (a) に類似しており、つまり $X4=30$ (下限値) の場合、 $X3$ の

増加によって平均総在庫はほぼ変わらず、これに対して $X_4=80$ の場合、 X_3 の増加によって平均総在庫が下がる。上述したように、 X_1 と X_3 はともに需要量の変動に関わり、値が大きくなると需要量の変動幅も大きくなると意味する。 X_4 は需要リードタイムであり、生産リードタイムより大きい場合、受注生産になる。十分な生産能力があれば、品切れのリスクが低減できる。しかし、需要量は生産能力を超える場合、受注生産であっても、需要を満たすことができない場合が生じる。たとえば、需要の到着率と需要量の変動係数が大きい場合、このようなことが発生する可能性がある。この場合、手持ち在庫がなくなり、受注残が生じ、平均総在庫が下がる。したがって、在庫システムを評価するとき、サービスレベルを表す指標と一緒に行う必要がある。

(2) サービスレベル

ここでは平均総在庫の解析と同様の手順で、サービスレベルについて考察を行う。あてはめられたモデルの決定係数 R^2 は0.92となっており、よい結果といえる。分散分析表を表5、予測プロファイルを図8、応答曲面を図9、そして因子のパラメータの推定値および要因間の交互作用をそれぞれ付録の図A-2と表A-3に示す。

表5 サービスレベルに関する分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
モデル	23	28.090678	1.22133	143.1600
誤差	286	2.439938	0.00853	p 値 (Prob>F)
全体 (修正済み)	309	30.530616		<.0001*

各図から、平均総在庫に似ている形が見られる。たとえば、予測プロファイルの図8から、 X_1 , X_2 , X_3 の増加により、サービスレベルが下がり、一方、 X_4 , X_6 , X_7 の増加により、サービスレベルが上がる。これは需要量の変動 (X_1 , X_2 , X_3) がサービスレベルにマイナス、能力 (X_4 , X_6 , X_7) の増加がプラスの効果を与えると考えられる。 X_4 は需要リードタイムで、利用できる場合、前述したように受注生産の効果があり、生産能力を調整する

機能があるといえよう。

要因間の交互作用について、十分な能力 (X6, X7) がある場合、たとえば、上限値の場合、X1, X2, X3が増えても、サービスレベルが下がらない。言い換えれば、十分な能力がない場合、需要のリスクが上がったら、サービスレベルが下がることになる。図9 (a) はサービスレベルと因子X2, X4に関する応答曲面である。X2は上限値、X4は下限値の場合、サービスレベルは0.4未満になっている。これは明らかに能力不足の状態が生じた。X4は上限値の場合、より長い需要リードタイムを生産に利用できるため、サービスレベルも改善された。図9 (b) はサービスレベルとX4, X7に関する応答曲面である。ここでもX4とX7はともに下限値の場合、サービスレベルが低い。1つの因子の水準値を増加させるにつれ、改善の効果が見られる。ここに留意したいのは図の見やすさのため、応答曲面図においてX7の軸が右から左への方向で数値が大きくなると設定している。

各要因および要因間の交互作用が平均総在庫とサービスレベルに対しての効果を評価した。解析結果および考察から、X1, X2, X3の水準値が上がったら、平均総在庫およびサービスレベルが下がり、それに反して、X4, X6, X7は逆の効果をもたらす。ここに、サービスレベルを向上させるには、在庫水準を増やすということになる。

シミュレーション実験には、X5 (需要リードタイムの変動係数) も因子として実験計画を立てた。しかし、最初の統計分析から平均総在庫およびサービスレベルにほぼ効果がないという結果が得られた。本研究で提案したシステムでは、需要のリードタイムに基づき、生産指示および出荷を行う。需要リードタイムの変動があっても、到着したらすぐ正確な時間がわかり、意思決定の時点で、この変動の要因をすでに排除したと考えられる。そのため、解析結果から、変動の効果が見られなかったであろう。

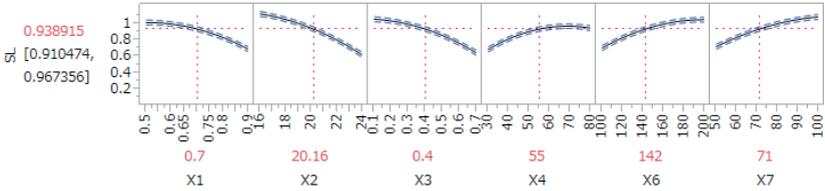
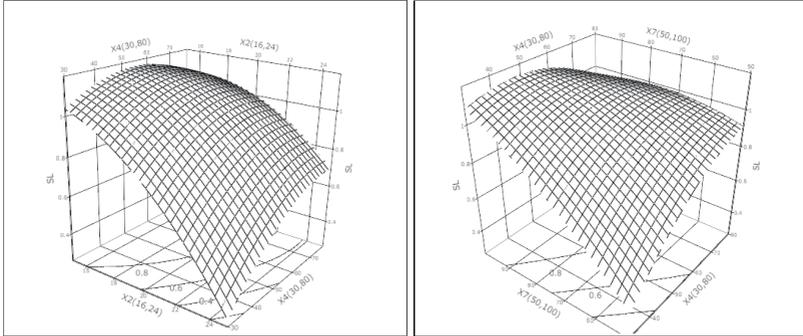


図8 サービスレベルの予測プロファイル



(a) X2とX4の影響

(b) X4とX7の影響

図9 サービスレベルに関する応答曲面

5. おわりに

本研究では、ADIを利用したプル生産在庫システムの性能をシミュレーションと統計手法を用いて評価した。まず、ADIの有無の効果があるかどうかを調べた。ADIの効果があることが確認された後、さらにADIありのシステムを解析した。

対象システムにおいて、需要の到着率、需要量およびその変動係数、需要リードタイムおよびその変動係数、かんばん枚数、基点在庫水準を因子とし、平均総在庫とサービスレベルを評価尺度とし、実験計画を立ててシミュレーション実験を実施した。その結果を応答曲面法で解析かつ考察した。結論として、①需要の到着率、需要量およびその変動係数の増加により、品切れのリスクが増え、平均総在庫とサービスレベルが下がる。②需要のリードタイム、かんばん枚数、基点在庫水準の増加により、サービスレベルが改善され、平均総在庫もあがる。しかし、本研究では、7つの要

因を取り上げ、水準値の範囲や要因間の交互作用などで、尺度に対しての効果は一定の条件に依存する。そして、分析するとき、平均総在庫およびサービスレベルを同時に考慮すべきであろう。今後の課題として、この2つの尺度を最適化することを目標とし、対象システムをさらに解析していく。

A 付録

表A-1 実験結果の抜粋

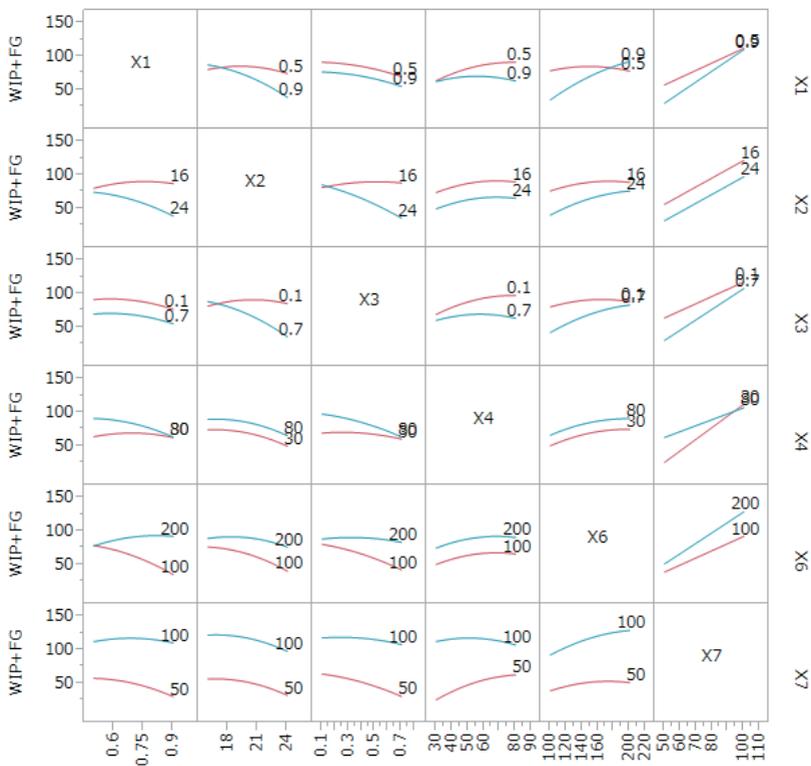
No	パターン	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	WIP	FG	SL	WIP+FG
1	0+000+ -	0.7	24	0.4	55	0.4	200	50	11.50	18.58	46.74%	30.08
2	+0+000 -	0.9	20	0.7	55	0.4	150	50	8.34	5.23	20.35%	13.57
3	000 - +0+	0.7	20	0.4	30	0.7	150	100	18.76	89.31	99.98%	108.07
4	0	0.7	20	0.4	55	0.4	150	75	16.07	70.67	99.72%	86.74
5	+0+000+	0.9	20	0.7	55	0.4	150	100	19.41	92.88	99.91%	112.29
6	- 0 - 000+	0.5	20	0.1	55	0.4	150	100	11.45	97.05	100.00%	108.51
7	00 - - 0 - 0	0.7	20	0.1	30	0.4	100	75	15.64	35.02	61.69%	50.66
8	- 000++0	0.5	20	0.4	55	0.7	200	75	10.92	71.22	99.63%	82.15
299	+0 - 000+	0.9	20	0.1	55	0.4	150	100	24.55	91.50	99.91%	116.04
300	+0 - 000+	0.9	20	0.1	55	0.4	150	100	24.55	91.50	99.91%	116.04
301	+000 - +0	0.9	20	0.4	55	0.1	200	75	22.75	70.72	99.56%	93.46
302	000++0+	0.7	20	0.4	80	0.7	150	100	15.20	95.38	100.00%	110.58
303	0	0.7	20	0.4	55	0.4	150	75	16.07	70.67	99.72%	86.74
304	- 0 - 000 -	0.5	20	0.1	55	0.4	150	50	11.59	47.14	100.00%	58.74
305	0++0 - 00	0.7	24	0.7	55	0.1	150	75	11.97	25.47	47.54%	37.44
306	000++0 -	0.7	20	0.4	80	0.7	150	50	16.92	45.52	99.49%	62.44
307	00 - - 0+0	0.7	20	0.1	30	0.4	200	75	17.96	65.34	99.76%	83.30
308	00 - +0+0	0.7	20	0.1	80	0.4	200	75	17.20	72.31	100.00%	89.51
309	0	0.7	20	0.4	55	0.4	150	75	16.07	70.67	99.72%	86.74
310	000++0 -	0.7	20	0.4	80	0.7	150	50	16.92	45.52	99.49%	62.44

表A-2 平均総在庫におけるパラメータの推定値

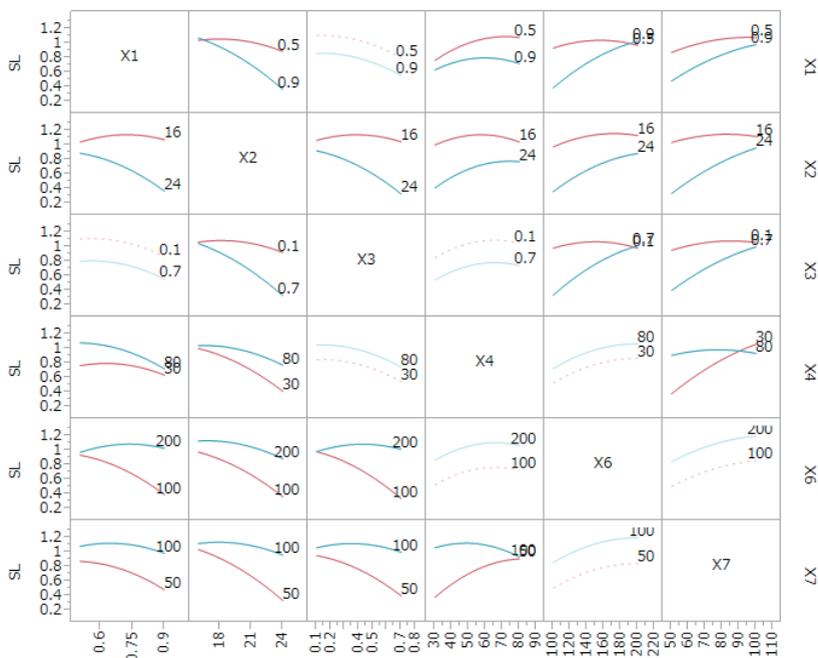
項	推定値	標準誤差	t 値	p 値 (Prob> t)
切片	84.252145	1.10973	75.92	<.0001*
X1(0.5,0.9)	-7.211224	0.73651	-9.79	<.0001*
X2(16,24)	-13.57017	0.73651	-18.42	<.0001*
X3(0.1,0.7)	-10.68068	0.73651	-14.50	<.0001*
X4(30,80)	7.0272359	0.73651	9.54	<.0001*
X6(100,200)	14.030985	0.73651	19.05	<.0001*
X7(50,100)	33.535201	0.73651	45.53	<.0001*
X1*X1	-6.106071	0.961055	-6.35	<.0001*
X1*X2	-10.56181	1.275673	-8.28	<.0001*
X2*X2	-7.563918	0.961055	-7.87	<.0001*
X2*X3	-14.05328	1.275673	-11.02	<.0001*
X3*X3	-4.491322	0.961055	-4.67	<.0001*
X1*X4	-6.600922	1.275673	-5.17	<.0001*
X3*X4	-6.264622	1.275673	-4.91	<.0001*
X4*X4	-7.526886	0.961055	-7.83	<.0001*
X1*X6	14.35286	1.275673	11.25	<.0001*
X2*X6	5.792839	1.275673	4.54	<.0001*
X3*X6	8.2772392	1.275673	6.49	<.0001*
X6*X6	-6.685879	0.961055	-6.96	<.0001*
X1*X7	6.327689	1.275673	4.96	<.0001*
X3*X7	5.911296	1.275673	4.63	<.0001*
X4*X7	-10.55415	1.275673	-8.27	<.0001*
X6*X7	6.0775306	1.275673	4.76	<.0001*

表A-3 サービスレベルに関するパラメータの推定値

項	推定値	標準誤差	t 値	p 値 (Prob> t)
切片	1.00902	0.014604	69.09	<.0001*
X1(0.5,0.9)	-0.123313	0.008432	-14.62	<.0001*
X2(16,24)	-0.217201	0.008432	-25.76	<.0001*
X3(0.1,0.7)	-0.154977	0.008432	-18.38	<.0001*
X4(30,80)	0.1009899	0.008432	11.98	<.0001*
X6(100,200)	0.1709051	0.008432	20.27	<.0001*
X7(50,100)	0.1783325	0.008432	21.15	<.0001*
X1*X1	-0.085237	0.011104	-7.68	<.0001*
X1*X2	-0.140542	0.014604	-9.62	<.0001*
X2*X2	-0.077639	0.011104	-6.99	<.0001*
X2*X3	-0.145079	0.014604	-9.93	<.0001*
X3*X3	-0.087146	0.011104	-7.85	<.0001*
X1*X4	-0.057444	0.014604	-3.93	0.0001*
X2*X4	0.0805141	0.014604	5.51	<.0001*
X4*X4	-0.120216	0.011104	-10.83	<.0001*
X1*X6	0.152026	0.014604	10.41	<.0001*
X2*X6	0.0931554	0.014604	6.38	<.0001*
X3*X6	0.171272	0.014604	11.73	<.0001*
X6*X6	-0.089183	0.011104	-8.03	<.0001*
X1*X7	0.0743848	0.014604	5.09	<.0001*
X2*X7	0.1367328	0.014604	9.36	<.0001*
X3*X7	0.1245132	0.014604	8.53	<.0001*
X4*X7	-0.165325	0.014604	-11.32	<.0001*
X7*X7	-0.064863	0.011104	-5.84	<.0001*



図A-1 平均総在庫に関する要因間の交互作用



図A-2 サービスレベルにおける要因間の交互作用

参考文献

1. Hariharan, R. and P. Zipkin, *Customer-order information, leadtimes, and inventories*. Management Science, 1995. 41(10): pp. 1599-1607.
2. 上野信行・呂海濤, 不確実な需要環境における販売・生産部門連携生産計画システム. 県立広島大学経営情報学部論集, 2013. 5: pp. 65-75.
3. Wang, T. and B.L. Toktay, *Inventory management with advance demand information and flexible delivery*. Management Science, 2008. 54(4): pp. 716-732.
4. Gayon, J.-P., S. Benjaafar, and F. de Véricourt, *Using imperfect advance demand information in production-inventory systems with multiple customer classes*. Manufacturing & Service Operations

- Management, 2009. 11(1): pp. 128-143.
5. Sarkar, S. and J.P. Shewchuk, *Use of advance demand information in multi-stage production-inventory systems with multiple demand classes*. International Journal of Production Research, 2013. 51(1): pp. 57-68.
 6. Claudio, D. and A. Krishnamurthy, *Kanban-based pull systems with advance demand information*. International Journal of Production Research, 2009. 47(12): pp. 3139-3160.
 7. Özer, Ö. and W. Wei, *Inventory control with limited capacity and advance demand information*. Operations Research, 2004. 52(6): pp. 988-1000.
 8. Krishnamurthy, A. and D. Claudio, *Pull systems with advance demand information, in Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, M.E. Kuhl, et al., Editors. 2005. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers. pp. 1733-1742.
 9. Wijngaard, J. and F. Karaesmen, *Advance demand information and a restricted production capacity: on the optimality of order base-stock policies*. OR Spectrum, 2007. 29(4): pp. 643-660.
 10. Liberopoulos, G. and Y. Dallery, *A unified framework for pull control mechanisms in multi stage manufacturing systems*. Annals of Operations Research, 2000. 93: pp. 325-355.
 11. Baynatt, B., J.A. Buzacott, and Y. Dallery, *Multiproduct Kanban-like Control Systems*. international Journal of Production Research, 2002. 40(16): pp. 4225-4255.
 12. Kelton, W.D., R.P. Sadowski, and D.T. Sturrock, *Simulation with arena*, 3rd ed. 2004. New York: McGraw-Hill.
 13. 高桑宗右エ門, *CIM生産システムのシミュレーション最適化—理論と実践—*, 1994. コロナ社.
 14. Hopp, W.J. and M.L. Spearman, *Factory physics*, 3rd ed. 2008. New York: McGraw-Hill.